

ANALISA KEGAGALAN LERENG BATUAN VULKANIK PADA JALAN MALINO – SINJAI DENGAN MENGGUNAKAN PEMODELAN ELEMEN HINGGA

Ardy Arsyad¹, Wahniar Hamid², Andi Yusmin², Fadly Ibrahim²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. P. Kemerdekaan Km. 10 Makassar, ardy.arsyad@unhas.ac.id

² PT. Yodya Karya (Persero) Cabang Makassar, Jl. A.P. Pettarani 74 Makassar

Studi ini memaparkan mekanisme kegagalan lereng pada Km. 131 Poros Jalan Malino – Sinjai dengan menggunakan pemodelan elemen hingga. Proses keruntuhannya dianalisa dengan *back calculation*, dan disimulasi, termasuk juga simulasi potensi re-aktifasi lereng dan alternatif perkuatannya. Lereng pada lokasi ini merupakan batuan vulkanik dengan stratigrafi lempung kerikil terpadatkan (*breccia vulkanik*) dan lempung keras hingga lempung sangat keras (*tufa impermeable*). Pemodelan dilakukan dengan menggunakan Mohr-Coulomb sebagai model konstitutif untuk tanah, dan elasto-plastic untuk struktur perkuatan lereng. Pengaruh beban lalu lintas juga dievaluasi untuk menganalisa stabilitas lereng pasca longsor. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa kegagalan lereng terjadi karena proses rembesan air ketika muka air tanah meninggi. SF lereng ketika muka air normal adalah 1.43 menjadi 0.98 ketika muka air tanah meninggi. Bidang gelincir berada pada lereng atas jalan, dengan radius 7 meter dari *crest* lereng. Potensi longsor susulan pada lereng dimungkinkan karena SF masih rendah, 1,12. Perkuatan lereng bawah jalan dengan borepile dan benching pada lereng atas jalan dapat meningkatkan SF lereng menjadi SF = 1.45 dimana bidang gelincir sudah berada pada interface lapisan tufa impermeable dan breksi vulkanik.

Kata kunci: *batuan vulkanik, longsor, Malino – Sinjai, FEM, Safety Factor*

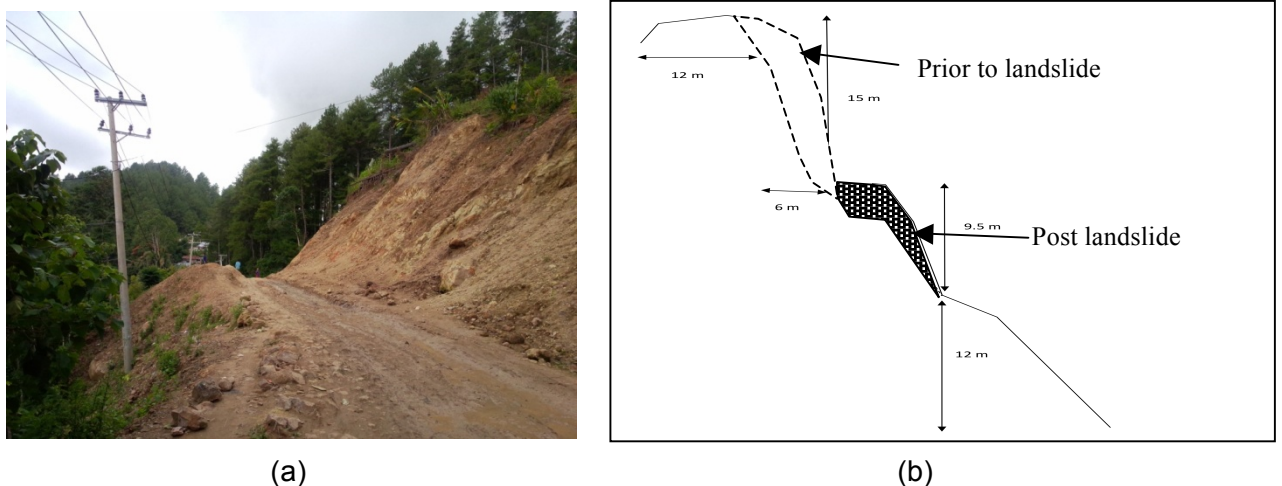
1. PENDAHULUAN

Penanganan daerah rawan longsor pada poros Malino – Sinjai sangat penting karena jalan ini merupakan jalan propinsi yang menghubungkan Makassar, ibukota Propinsi Sulawesi Selatan dengan Malino, kawasan agrowisata dan agrobisnis, dan juga Sinjai, daerah perikanan Teluk Bone. Jalan yang terbangun pada masa kolonial, merupakan alternatif jalan terpendek menuju ke pesisir timur Sulawesi Selatan. Namun demikian, pemanfaatan jalan ini belum maksimal, karena lebar jalan masih sempit dan berada pada timur laut pegunungan Lompobattang dengan kontur medan yang terjal (Gambar 1) yang rawan longsor. Pada bulan Juli 2013, lereng pada Km. 131 mengalami kegagalan (Gambar 2). Lereng sepanjang 300 meter dengan tinggi 15 meter dan kemiringan hampir 70° mengalami longsor dan menimbun badan jalan setinggi 4 meter. Tidak ada korban jiwa, namun telah memutus sementara jalur Malino – Sinjai. Pada bulan Juli hingga Oktober memang merupakan musim hujan dengan curah hujan

tinggi. Back *calculation* dilakukan pada studi ini untuk mensimulasi mekanisme kegagalan lereng dengan menggunakan pemodelan elemen hingga. Analisa stabilitas lereng pasca longsor dan pasca perkuatan lereng dilakukan untuk mengevaluasi alternatif struktur penanganan lereng ini.



Gambar 1. Lokasi Lereng Km. 131+000 Poros Jalan Malino - Sinjai



Gambar 2. Kondisi lereng pasca longsor (a) dan ilustrasi kondisi lereng sebelum longsor dan pasca longsor (b).

2. SIFAT LERENG BATUAN VULKANIK

Secara geologi, jalan poros Malino - Sinjai terletak di formasi batuan vulkanik Lompobattang, dengan stratigrafi meliputi breksi vulkanik, tufa dan lava dengan lapisan yang kadang berselingan, dengan morfologi lereng yang sangat terjal lebih dari 45° (Imran dkk, 2012; Yuwono, 1989, Sukamto dan Supriatna, 1982). Batuan ini sudah

mengalami *weathering* yang sangat intensif ditandai dengan banyaknya diskontinuitas berupa rekahan dan retakan (Imran dkk, 2012), dengan RQD 49,89% (Mahdi, 2011). Pelapukan batuan vulkanik pada lereng dapat dilihat pada Gambar 3. Dengan presipitasi hujan yang tinggi, maka mudah sekali terjadi aliran air yang merembes pada diskontinuitas ini, kemudian mengalir pada lapisan antara breksi vulkanik dengan tufa yang *impermeable*. Akibat dari aliran air ini adalah, batuan vulkanik termasuk tanahnya mudah sekali untuk slaking (hancur) dan swelling (mengembang). Kaitan antara derajat pelapukan, presipitasi hujan dan longsornya lereng sangat signifikan (Sadisun, 1998). Pada lokasi lereng, adanya beberapa mata air yang muncul setelah peristiwa longsor menandakan bahwa breksi vulkanik dan tufa sudah mengalami pelapukan tajam. Aliran air menyebabkan deformasi lereng dimana kekuatan geser batuan menurun tajam seiring meningkatnya kadar air batuan vulkanik (Kawamura dan Miura, 2011). Selain itu, struktur geologi didominasi pula oleh sesar dan joint pada batuan. Terdapat pula patahan minor ditandai oleh gawir-gawir pada dinding tebing. Patahan ini berarah utara-selatan, selaras dengan patahan Walanae (Imran dkk, 2012).



Gambar 3. Pelapukan batuan



Gambar 4. Mata air pada kaki lereng.

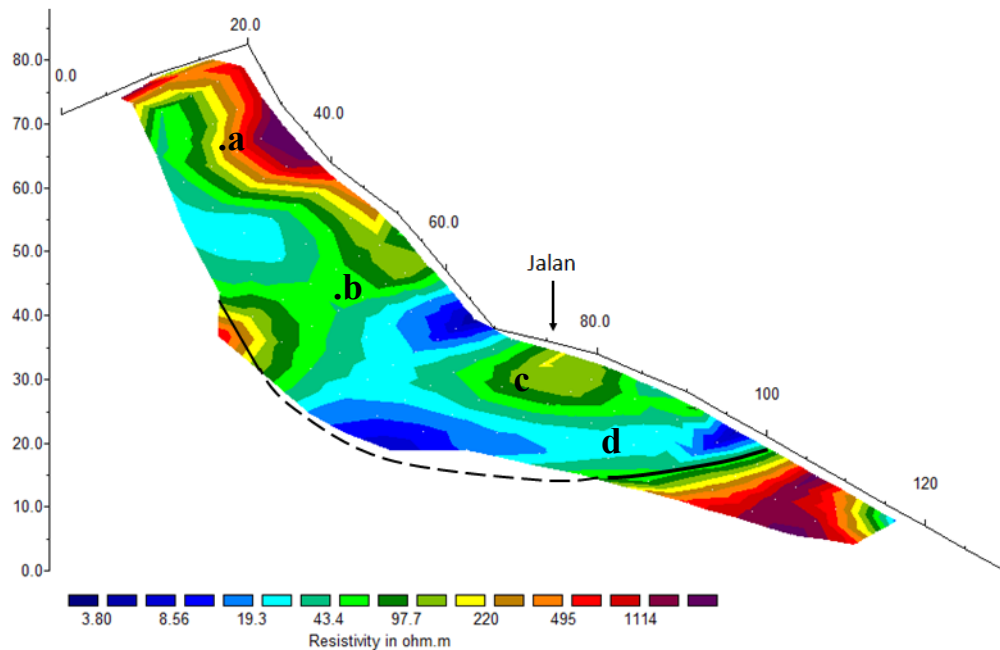
3. STRATIGRAFI DAN GEOMEKANIK LERENG

Kondisi bawah permukaan lereng diteliti dengan melakukan pendugaan resistifitas batuan dan pengeboran inti. Data yang didapatkan dari dua penyelidikan dipakai dalam simulasi numerik. Selain itu data resistifitas batuan juga memberi informasi awal mengenai bidang gelincir pada lereng.

Survey Geolistrik

Pengambilan data geotomografi dilakukan secara langsung di lapangan dengan menggunakan konfigurasi Wenner dan Wenner Schlumberger. Data yang diperoleh dijadikan model sintetik dengan menggunakan perangkat lunak Res2Dmod yang menghasilkan penampang (apparent resistivity), yang kemudian diinversikan dengan menggunakan perangkat lunak Res2Dinv yang menghasilkan profil 2D true resistivity. Parameter pada model sintetik ini kemudian dijadikan parameter lapangan untuk akuisisi data. Hasil inversi dengan menggunakan perangkat lunak Res2Dinv berupa profil 2D secara vertikal yang dapat menunjukkan kedalaman dan sebaran resistivitas sebenarnya. Dari Gambar 5 terlihat bahwa pada titik a dengan nilai resistivitas antara

495 – 1114 Ω m yang berada pada tinggian diinterpretasikan sebagai lapisan batuan yang masif (massive rock). Selanjutnya pada titik b yang menunjukkan nilai resistivitas berkisar antara 3.80 – 97.7 Ω m berada pada lintasan dengan posisi 50 – 100 m diinterpretasikan sebagai lapisan soil yang tinggi akan kandungan airnya (*Lateric soil with high saturation of water*). Sedangkan pada titik c yang memperlihatkan nilai resistivitas >220 Ω m yang sangat kontras dengan titik b diinterpretasikan sebagai lapisan bed rock, sehingga terlihat jelas bidang kontinuitas antara lapisan soil dan lapisan bed rock nya yang digambarkan dengan garis tegas/titik d yang disebut sebagai bidang gelincir (*sliding surface*).



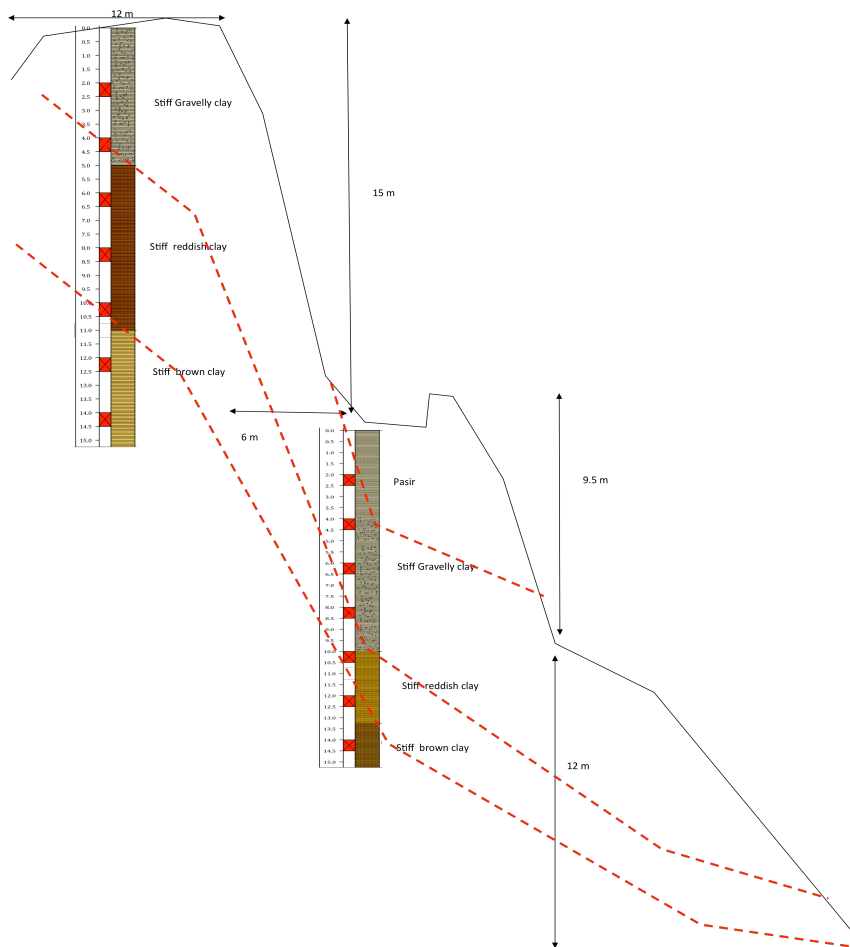
Gambar 5. Citra Lintasan Hasil Inversi Res2dinv dengan Topografi. a) *Massive Rock*, b) *Lateric soil with high saturation of water*, c) *Bed Rock*, d) *Sliding Surface*.

Bor-log dan Sifat Geoteknik Lereng

Hasil pengeboran inti dan pengujian sampel tanah di laboratorium mengindikasikan bahwa pada lereng bawah, permukaan jalan hingga elevasi –10 m, terdapat lempung campur gravel berwarna coklat abu-abuan dengan konsistensi sangat kaku-keras. Pada lapisan antara -10 hingga -13,4 m, terdapat lempung berwarna coklat kemerahan dengan konsistensi keras. Dibawah lapisan ini, terdapat lempung dengan warna coklat tua berkonsistensi keras (Gambar 6). Pada lereng atas, pada elevasi +15 m, terdapat lempung campur gravel, berwarna coklat abu-abuan. Pada elevasi +10 m hingga +4 m, lempung berwarna coklat kemerahan berkonsistensi agak kaku-keras. Pada elevasi antara +4 m hingga -5 m, masih didapatkan lempung berwarna coklat muda dengan konsistensi sangat kaku.

Stratigrafi lereng memang didominasi oleh batuan lempung yang mengeras karena efek geologi. Dari hasil percobaan oedometer, Over Consolidated Ratio (OCR) tidak melebihi 1, yang berarti tanah pada lereng ini terkonsolidasi normal. Berat volume tanah, berkisar antara 26,21 kg/cm³ hingga 33,61 kg/cm³. Indeks plastisitas (PI)

berkisar dari 11% hingga 14%. Jenis tanah lempung terkompaksi ini bukanlah lempung aktif, karena nilai activity-nya kurang dari 0,75.



Gambar 6. Stratigrafi lereng berdasarkan data bor log.

BACK ANALYSIS DAN SIMULASI FEM

Back analysis dilakukan untuk mengetahui mekanisme longsor lereng. Geometri lereng didapatkan dari hasil pengukuran topografi Kemiringan lereng atas mencapai hampir 70° , sementara lereng bawah memiliki kemiringan 40° . Parameter sifat mekanis tanah dari hasil lab terutama uji geser langsung dan konversi N-SPT untuk menentukan modulus elastisitas tanah (Bowles, 1996). Parameter tanah untuk pemodelan berbasis finite element model, ditunjukkan oleh Tabel 1. Hanya saja untuk jenis tanah gravelly clay, parameter kohesi dan sudut gesernya dikurangi untuk mendapatkan hasil longsoran mewakili kondisi lapangan. Pengurangan nilai kohesi dan sudut geser karena kondisi lempung bergravel sudah melapuk, dan dalam kondisi jenuh air. Model konstitutif yang dipakai adalah Mohr-Coulomb untuk tanah dan batuan, dan elastoplastic model untuk struktur.

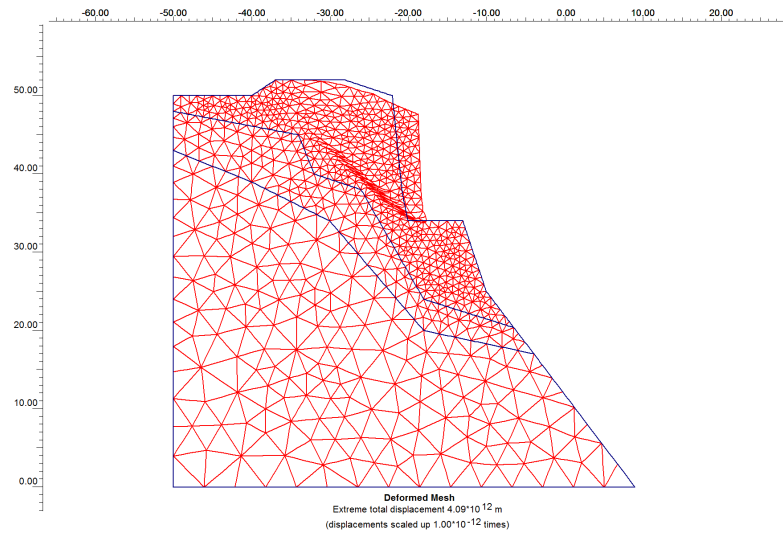
Pada simulasi ini, diselidiki pula pengaruh tingginya muka air tanah pada stabilitas lereng. Olenya itu, kondisi permukaan air tanah yang tinggi ketika musim hujan, dan muka air tanah normal merupakan dua kondisi yang disimulasi secara terpisah. Dengan menggunakan Plaxis, stabilitas lereng dilakukan dengan metode *gravity loading*, dimana loading inputnya memakai sistem *total multiplier*. Setelah itu, ϕ/c reduction digunakan, untuk mencari bidang gelincir dan menghitung faktor keamanan (SF) lereng.

Tabel 1. Parameter geomekanik Tanah Lereng

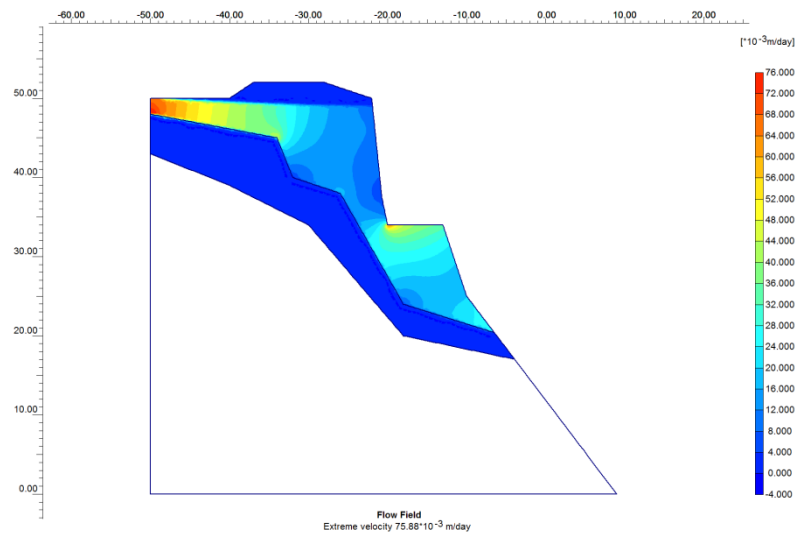
Parameter	Unit	Gravelly clay	Clay	Stiff Clay
General				
Material Model	Model	MC	MC	MC
Type	Type	drained	undrained	non-porous
γ_{unsat}	kN/m ³	17	18.3	18.4
γ_{sat}	kN/m ³	18	19.3	19.4
Parameter				
E	kPa	8741	12000	14700
μ	-	0.4	0.4	0.4
α	-	-	-	-
β	-	-	-	-
cohesion	kPa	5	9.7	10.6
ϕ	°	20	23.8	26.7
Flow Parameter				
K_x	m/day	1	8.64E-07	0
K_y	m/day	1	8.64E-07	0
Initial				
K_0	-	auto	auto	auto
OCR	-	1	1	1
POP	-	0	0	0
Interfaces				
Interface strength		rigid	rigid	rigid
R_{inter}		1	1	1

Mekanisme Kegagalan Lereng dan Pengaruh Muka Air Tanah

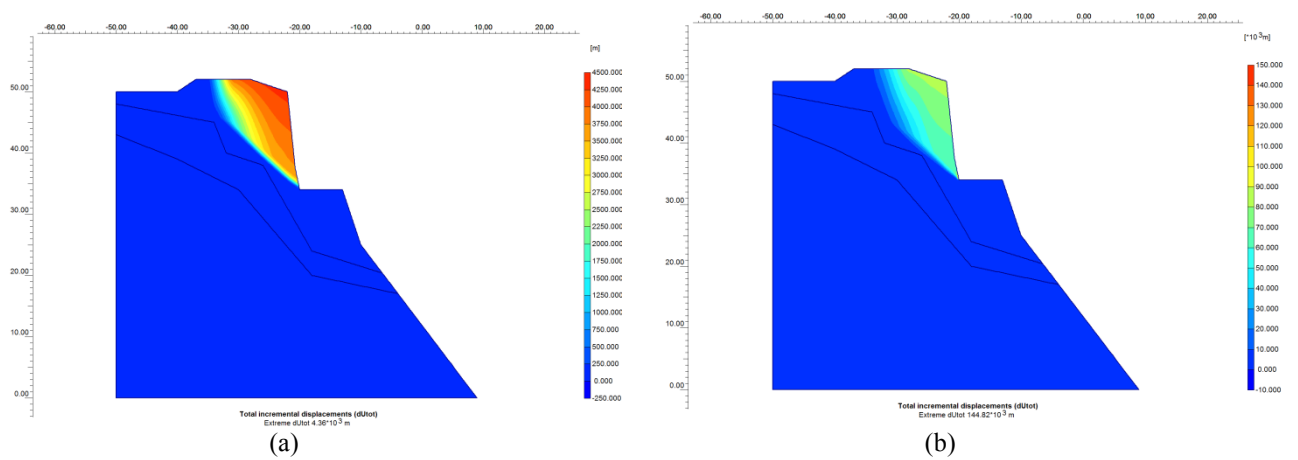
Proses kelongsoran lereng ditandai dengan deformasi lereng dimana bidang gelincirnya berada pada radius 5 meter dari kaki lereng (Gambar 7). Safety faktor (SF) lereng ini hanya 0.98. Dari Gambar 8, hasil simulasi memang mengindikasikan adanya aliran air sebesar 75,68 m³ per hari terdapat pada kaki lereng. Hal ini terkonfirmasi dengan adanya mata air di kaki lereng pasca longsor. Pengaruh aliran air tanah sangat signifikan pada proses kelongsoran lereng. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peninggian muka air tanah pada lereng dapat menurunkan SF faktor dari 1.43 menjadi 0.98 (Gambar 9). Bidang gelincir menandakan tipe longsor adalah rotational landslide non circular. Selain faktor aliran air tanah, faktor geometri lereng juga menjadi pemicu ketidakstabilan lereng. Dari pendataan geolistrik, diduga bahwa bidang gelincir berada cukup jauh di bawah jalan, yaitu pada bidang pertemuan lempung kerikil (breccia vulkanik) dengan lempung keras (tufa impermeable). Namun hasil simulasi FEM, bidang gelincir berada pada lereng atas jalan.



Gambar 7. Deformasi lereng sebagai mekanisme kegagalan lereng.



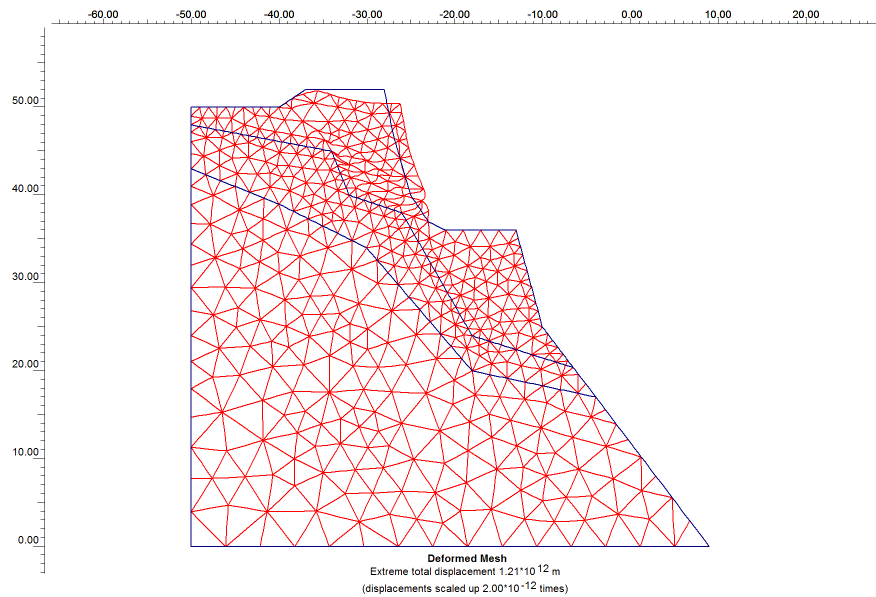
Gambar 8. Aliran air pada lereng berdasarkan hasil simulasi FEM.



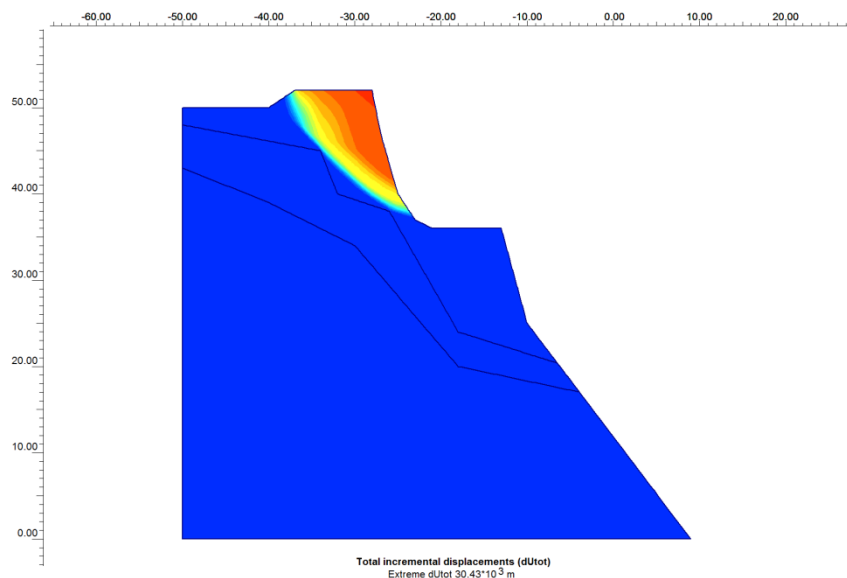
Gambar 9. Bidang Gelincir pada lereng dengan (a) muka air tanah maksimum, SF = 0.98 dan (b) muka air normal SF = 1.43.

Stabilitas lereng pasca longsor

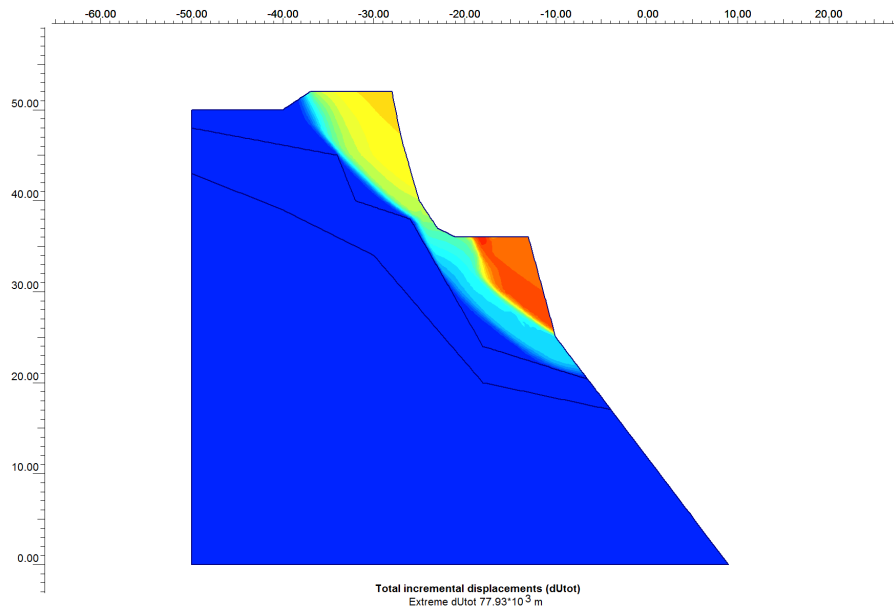
Persoalan kestabilan lereng setelah terjadinya longsor diselidiki kembali. Hal ini dikarenakan posisi jalan mengalami peninggian dan lereng bawah mendapatkan beban tambahan. Dari hasil simulasi, potensi terjadinya gelincir cukup besar, diindikasikan dengan adanya deformasi tambahan pada lereng atas (Gambar 10), dan rendahnya $SF = 1,15$ (Gambar 11). Pengaruh beban kendaraan (2 ton/m^2) pada lereng juga dievaluasi. Didapatkan dari hasil simulasi bahwa deformasi dan bidang gelincir meliputi juga lereng bawah dengan $SF = 1.12$ (Gambar 12). Ini menandakan bahwa perkuatan lereng bukan hanya dilakukan di lereng atas tapi juga di lereng bawah jalan.



Gambar 10. Deformasi pasca longsor.



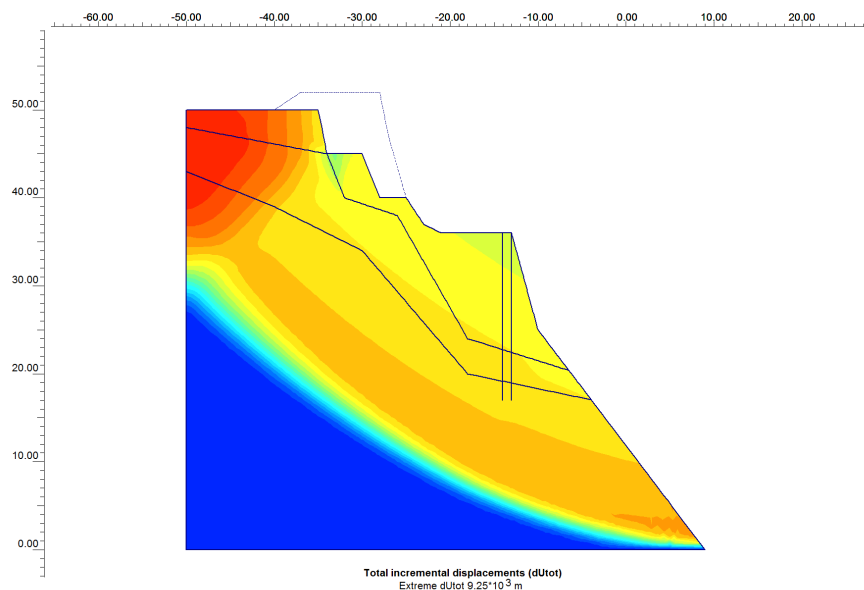
Gambar 11. Bidang gelincir pada lereng pasca longsor, $SF = 1,15$.



Gambar 12. Bidang gelincir pada lereng pasca longsor dengan mempertimbangkan beban kendaraan 2 ton/m² pada jalan, SF = 1,12.

PERKUATAN DENGAN BORE PILES DAN BENCHING LERENG

Alternatif perkuatan lereng dengan menggunakan bore piles pada lereng bawah dan benching pada lereng atas juga dievaluasi. Borepiles dimodelkan sebagai pelat dengan $EA = 3937.5 \text{ kN/m}^2$, $EI = 257.709 \text{ kN/m}^2$, $w = 4,7 \text{ kN/m/m}$ dan $v = 0,15$. Diameter bore pile 100 cm, dengan panjang hingga mencapai 16 meter, mencapai lapisan tufa impermeable. Sementara lereng atas dibuat terap untuk memperkecil sudut keterjalannya. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa SF meningkat menjadi 1,45 (Gambar 13). Bidang gelincir hanya pada permukaan hanya pada pergeseran kepala tiang. Displacement terjadi hanya sebesar 5,86 mm pada bentang tengah tiang.



Gambar 13. Bidang gelincir pada lereng setelah diperkuat dengan borepile dan diterap, SF = 1,45.

KESIMPULAN

- a. Mekanisme kegagalan lereng pada Km. 131 poros jalan Malino – Sinjai dipengaruhi oleh meningkatnya muka air tanah pada lereng pada sifat batuan vulkanik yang melapuk.
- b. SF pada lereng dengan muka air normal adalah 1.43. Dengan meningkatnya muka air tanah, SF lereng turun menjadi 0,98. Bidang gelincir terdapat pada lereng atas dengan radius gelincir 7 m dari crest lereng.
- c. Stabilitas lereng pasca longsor masih tetap rendah, diindikasikan dari $SF = 1,15$ dimana bidang gelincir tetap berada pada lereng atas.
- d. Pengaruh beban dinamis kendaraan dapat memperluas kemungkinan terjadinya bidang gelincir yang meliputi juga lereng bawah, dengan $SF = 1,12$.
- e. Perkuatan dengan bored pile pada lereng bawah dapat meningkatkan SF menjadi 1,45. Sementara benching lereng pada lereng atas membuatnya stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E. 1996. Foundation Analysis and Design, 5th Ed. Mc. Graw-Hill, 1175p.
- Imran, A.M., Azikin, B., Sultan. 2012. Peranan Aspek Geologi sebagai Penyebab Terjadinya Longsoran pada Ruas Jalan Poros Malino – Sinjai. Buletin Geologi Tata Lingkungan, Vol 22 no. 3. Pp. 185 – 196.
- Kawamura, S., Miura, S., Ishikawa, T., Ino, H., 2009. Failure Mechanism of Volcanic Slope due to Rainfall and Freeze-thaw Action. Prediction and Simulation Method for Geohazard Mitigation. Taylor and Francis Group, London, p. 25 -31.
- Mahdi, 2011. Studi Gerakan Tanah pada Poros Jalan Raya Daerah Manipi Kecamatan Sinjai Barat Kabupaten Sinjai Propinsi Sulawesi Selatan. Skripsi S-1 Teknik Geologi Unhas, Makassar.
- Sukanto, Supriatna. 1982. Geologi Lembar Ujung Pandang, Benteng dan Sinjai Sulawesi. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Direktorat Jenderal Pertambangan Umum. Departemen Pertambangan dan Energi Bandung.
- Sadisun, I.A., 1998. Pengaruh Pelapukan Batulempung Formasi Subang terhadap Beberapa Sifat Keteknikannya Guna Menunjang Efektifitas Pemilihan Desain Perkuatan Lereng. Lembaga Penelitian ITB Bandung.
- Yuwono, Y.S. 1989. Petrologi dan Mineralogi Gunung Lompobattang Sulawesi Selatan: dalam Geologi Indonesia. Jurnal IAGI, Vol. 12 No. 1. Pp. 483 – 509.